

2.7

ENDOKARST COSTERO, NIVELES MARINOS Y TECTÓNICA: EL EJEMPLO DE LA COSTA ORIENTAL DE MALLORCA

Joaquín GINÉS ¹, Joan J. FORNÓS ¹, Àngel GINÉS ² y Paola TUCCIMEI ³

1) *Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca.*

2) *Àrea d'Ecologia, Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca.*

3) *Dipartimento di Scienze Geologiche, Università "Roma Tre", Roma.*

INTRODUCCIÓN

El carácter inestable –a escala geológica– del nivel de las aguas marinas conlleva una compleja gama de consecuencias sobre el devenir geomorfológico del endokarst costero, a las que es necesario dedicar atención. Las interacciones entre el nivel marino y la morfogénesis subterránea en las costas calcáreas se concretan en dos grandes grupos de consecuencias: por una parte, tienen lugar unas repercusiones de índole *activa*, como podría ser el papel del mar como nivel de base que controla los mecanismos de erosión kárstica y la dinámica litoral en las costas carbonatadas; por otro lado, existen otras interferencias que cabría calificar de *pasivas*, entre las cuales se contarían por ejemplo la inundación (durante pulsaciones transgresivas) de cuevas litorales que han evolucionado previamente en condiciones vadosas, así como la posible precipitación de carbonatos freáticos en los lagos subterráneos así generados.

Todas estas interacciones entre modelado litoral y morfogénesis endokárstica originan un entramado de formas y sedimentos característicos (Montoriol-Pous, 1961; Gràcia y Vicens, 1998; Ginés, 2000), en los que la historia del nivel marino durante el Cuaternario introduce una incuestionable componente geocronológica, que a su vez se ve afectada por los movimientos tectónicos recientes. La posibilidad de relacionar las etapas morfo-sedimentarias discernibles en las cavidades costeras con paleoniveles del mar se muestra sumamente útil para la reconstrucción, y ubicación en el tiempo, de los acontecimientos que han ido configurando la evolución geomorfológica de las áreas calcáreas litorales. Dentro de esta línea, en el presente trabajo se expone en primer lugar el escenario general de las interferencias entre los dos modelados de nuestro interés –karst y litoral– para, acto seguido, abordar en extenso algunas de esas interacciones, concretamente la espeleogénesis en el Levante de Mallorca y el registro geocronológico constituido por los espeleotemas freáticos de sus cuevas costeras.

LAS INTERFERENCIAS ENTRE ENDOKARST COSTERO Y MODELADO LITORAL

Aparte del estudio de las microformas de erosión en los litorales calcáreos, que cuentan con una relativamente extensa bibliografía (ver referencias incluidas en Gómez-Pujol y

Fornós, 2001 y Gómez-Pujol, 2006), las interrelaciones geomorfológicas entre costa y karst –abordadas en un sentido amplio– han comenzado a ser objeto de interés a partir sobre todo del inicio de la década de 1980. Desde ese momento ha ido viendo la luz una relativamente extensa bibliografía, entre la que destacan algunas obras de síntesis como las de Guilcher *et al.* (1982) y Nicod (1986); en ambas publicaciones se individualizan con claridad dos bloques temáticos bien diferentes, como son por un lado el estudio particularizado de las formas de lapiaz litoral y, por otra parte, la interpretación de las relaciones que se establecen entre las variaciones del nivel marino y la evolución de los macizos calcáreos costeros, abordándose por tanto el karst litoral como un sistema complejo en el que participen modelados diversos tanto a nivel epigeo como hipogeo. Paralelamente, los manuales recientes sobre geomorfología kárstica comienzan también a ocuparse de las relaciones entre costa y karst (Jennings, 1985; Ford y Williams, 1989; Klimchouk *et al.*, 2000), enfatizando el interés que presenta el estudio de los condicionantes que las oscilaciones del nivel marino introducen en el desarrollo del karst costero.

A pesar de la relativa abundancia de literatura reciente sobre estas cuestiones, se echan a faltar intentos de sistematización de las interferencias entre los dos modelados que actúan en este particular dominio geomorfológico. Con esta intención se ha elaborado la Tabla 1, la cual pretende esquematizar las consecuencias morfogénicas que las oscilaciones del nivel marino tienen sobre el karst litoral, centrándonos ya de manera exclusiva en las repercusiones relacionadas con la génesis y evolución de las formas endokársticas. Se han distinguido cuatro categorías de interacciones que serán desarrolladas a continuación.

Comenzando por las implicaciones de índole hidrogeológica, la superficie de las aguas marinas constituye el nivel de base al cual se ajusta la posición altimétrica del plano de las aguas freáticas litorales. Esta circunstancia origina, en primera instancia, el establecimien-

hidrología	<ul style="list-style-type: none"> - control marino de la cota de las aguas freáticas litorales - presencia de lagos de aguas salobres que inundan las cuevas costeras - control marino del drenaje hacia las surgencias costeras - procesos de disolución de carbonatos asociados a la zona de mezcla entre aguas continentales y marinas
morfogénesis	<ul style="list-style-type: none"> - control marino de las zonas preferenciales de disolución y espeleogénesis - excavación de cavidades costeras de erosión marina - captura marina de cuevas de origen kárstico
rellenos de cavidades	<ul style="list-style-type: none"> - presencia de sedimentos de origen marino y/o eólico - presencia de secuencias estratigráficas complejas: sedimentos litorales, brechas kársticas, restos paleontológicos y espeleotemas - deposición freática de carbonatos controlada por el nivel marino actual o pretérito
geocronología	<ul style="list-style-type: none"> - correlaciones altimétricas entre morfogénesis endokárstica y paleolíneas de costa - datos cronológicos procedentes del registro paleontológico incluido en los sedimentos de las cuevas litorales - espeleotemas vadosos sumergidos bajo el nivel freático registran eventos climáticos de signo frío - espeleotemas de origen freático constituyen un excelente registro de los paleoniveles marinos cuaternarios transgresivos y/o regresivos

Tabla 1. Algunas consecuencias geomorfológicas de las oscilaciones eustáticas sobre el endokarst litoral.

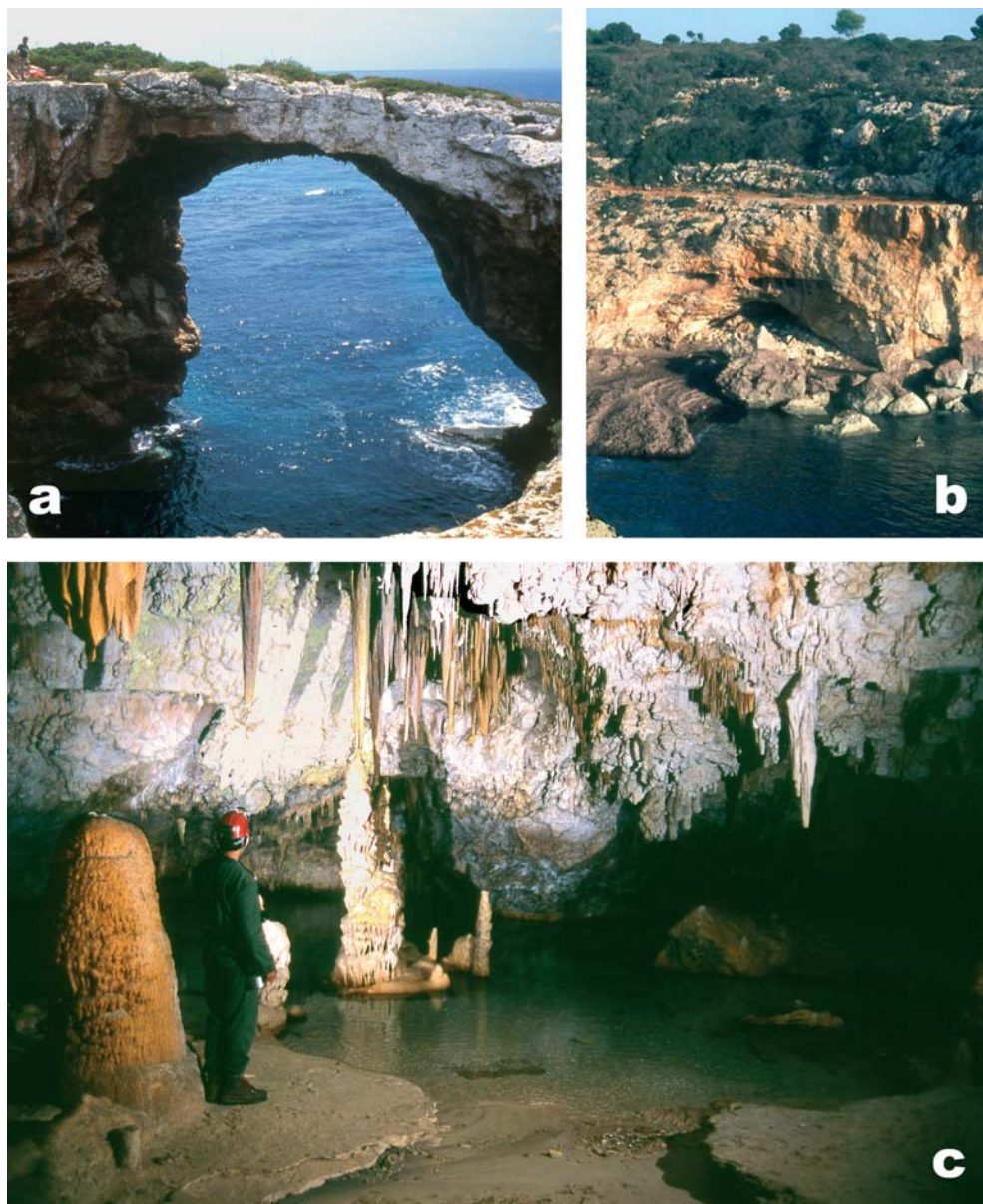


Figura 1. Ejemplos de interferencias entre el modelado endokárstico y la dinámica litoral. a) la Cova Marina des Pont (Manacor) es una cueva kárstica casi dismantelada por la erosión costera. b) en el caso de la Cova de Cala Falcó (Manacor), una cavidad de génesis marina ha capturado un fenómeno endokárstico preexistente, debido al paulatino retroceso de la línea de costa. c) la Cova de na Mitjana (Capdepera) es una cueva kárstico-marina en la que se conjugan variadas formas y sedimentos relacionados con las vicisitudes experimentadas por el nivel del Mediterráneo; nótese las arenas marinas, recubiertas por coladas estalagmíticas, que configuran una curiosa playa hipogea.

to de lagos subterráneos de aguas salobres en las cuevas de la franja costera (Ginés, 1995a), ya que el nivel del mar controla la disposición tridimensional de la lente de aguas subterráneas continentales y de las líneas de drenaje que alimentan numerosas surgencias costeras submarinas (Grodzicki, 1985; Smart *et al.*, 2006). Asimismo, es preciso resaltar que en la zona freática de las áreas kársticas litorales tienen lugar procesos de mezcla de aguas marinas y continentales, los cuales potencian la actuación de mecanismos espeleogenéticos a causa de la agresividad resultante de dichos procesos geoquímicos (Plummer, 1975; Back *et al.*, 1984).

Moviéndonos en el plano de las repercusiones de carácter morfogénico (Tabla 1) –entendiendo ahora este concepto en un sentido restringido tan sólo a la generación de formas erosivas– es bien patente que el mar, al actuar como nivel de base hidrogeológico, controla la posición de las zonas preferenciales de espeleogénesis (Mylroie y Carew, 2000; Smart *et al.*, 2006), ligadas a los mecanismos de mezcla antes mencionados. Aparte de estos procesos de disolución que tienen lugar en la zona freática, la dinámica litoral ocasiona la excavación de cuevas de génesis estrictamente marina, siendo habitual también que las cavidades de abrasión marina capturen vacíos de origen kárstico (Figs. 1a y 1b), dando lugar a fenómenos de origen mixto: serían las *capturas kárstico-marinas* de Montoriol-Pous (1971).

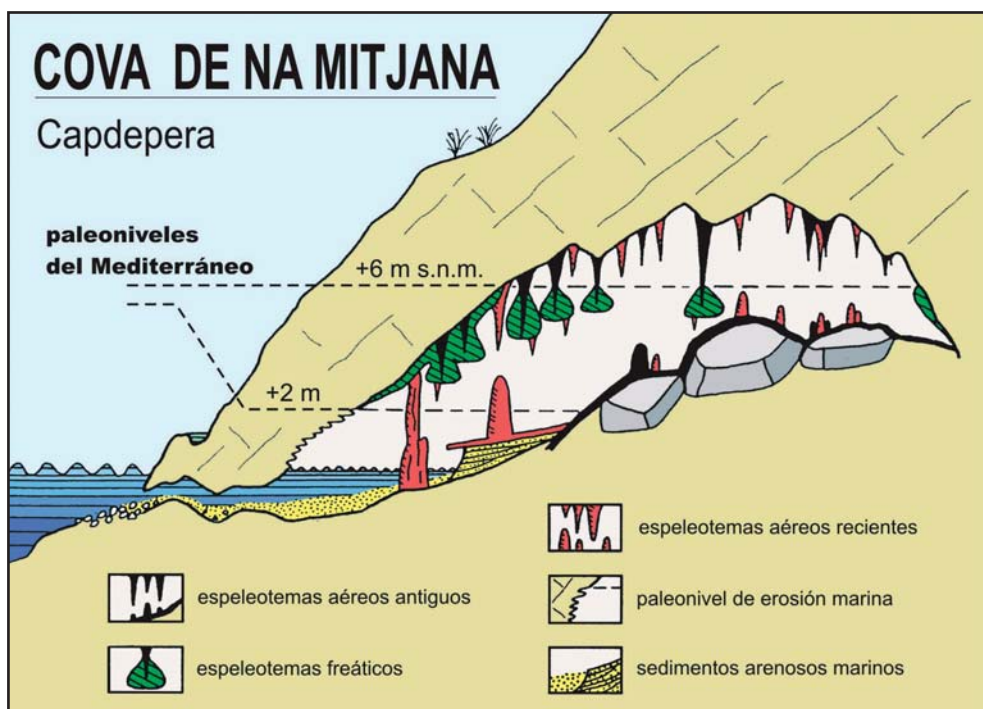


Figura 2. Representación esquemática de los conjuntos morfo-sedimentarios asociados a las fluctuaciones del nivel marino, observables en una cueva del Levante de Mallorca. El paleonivel de espeleotemas freáticos (+6 m s.n.m.) es anterior a la apertura de la entrada marina y corresponde probablemente al estadio isotópico 7, mientras que el nivel de erosión con perforaciones de litófagos (+2 m s.n.m.) se relaciona con la captura de la cueva por la erosión costera y correspondería al último interglacial (estadio isotópico 5).

En tercer lugar, resultan de sumo interés determinados rellenos de cavidades asociados de una manera u otra al carácter litoral de las formas subterráneas (Fig. 1c). Por un lado, las cuevas costeras contienen con frecuencia sedimentos diversos de origen marino y/o eólico (gravas, arenas...), interdigitados entre depósitos químicos vadosos (coladas estalagmíticas, susceptibles de datación radiométrica), formando a veces complejas secuencias estratigráficas que incluyen restos paleontológicos de vertebrados terrestres plio-pleistocénicos (Ginés y Fiol, 1981; Ginés, 2000). Pero sin duda el relleno de cavidad más conspicuo –y totalmente específico del endokarst costero– lo constituye la deposición freática de carbonatos, en lagos hipogeos controlados por la posición del nivel marino actual o pretérito (Ginés *et al.*, 1981b, 2005).

Finalmente, hay que aludir a las implicaciones geocronológicas que se derivan de la casuística esbozada en los párrafos precedentes (Fig. 2 y Tabla 1). En primer lugar, es fácil inferir la posibilidad del establecimiento de correlaciones altimétricas entre etapas morfo-genéticas concretas de algunas cavidades y paleolíneas de costa de edad conocida. Por otro lado, las formas endémicas de vertebrados terrestres, incluidos en las secuencias sedimentarias de algunas cuevas, pueden suministrar valiosos datos estratigráficos susceptibles de complementarse con datos geocronológicos obtenidos mediante la datación isotópica de depósitos estalagmíticos.

En otro orden de cosas, la presencia de estalagmitas aéreas sumergidas en los lagos actuales de cuevas costeras, documenta momentos de descenso relativo del nivel marino durante eventos climáticos de signo frío. Haciendo referencia también a la dialéctica que se establece entre fluctuaciones del nivel marino y deposición de espeleotemas, conviene resaltar la presencia de cristalizaciones freáticas de carbonatos, las cuales suponen un excelente registro de los paleoniveles marinos pleistocénicos (Ginés *et al.*, 1981a, 2002, 2003; Vesica *et al.*, 2000; Tuccimei *et al.*, 2006); su potencial de estudio, desde los puntos de vista paleoclimático y cronológico, nos obligará a ocuparnos de ellos con cierto detalle más adelante.

LA ESPELEOGÉNESIS EN EL LEVANTE DE MALLORCA

Aunque para algunos pueda no resultar del todo obvio, una de las manifestaciones más llamativas ligadas a la morfo-dinámica litoral, que se dan en Mallorca, está constituida por las abundantes cuevas kársticas existentes en el Levante de la isla (Ginés, 1995a). En esta área se localizan más de 200 cavidades subterráneas litorales de diversa magnitud, que en algún caso llegan incluso a superar en la actualidad los 10 km de desarrollo horizontal (Gràcia y Clamor, 2002). Aparte de su interés geomorfológico, estas cavidades han supuesto desde finales del siglo XIX uno de los principales atractivos turísticos del archipiélago balear (Ginés, 1995b).

Esta riqueza espeleológica obedece sobre todo a condicionamientos de tipo litológico. Los depósitos post-orogénicos del Mioceno superior que conforman el Sur y el Levante de Mallorca incluyen a grandes rasgos dos unidades que han resultado afectadas por los procesos de karstificación: una unidad inferior de carácter claramente arrecifal y edad Tortoniense-Messiniense (la denominada *Unidad Arrecifal*), así como un *Complejo Terminal* de edad fini-Messiniense, en el que se intercalan depósitos margo-calcáreos bioturbados junto con niveles estromatolíticos y facies oolíticas (Fornós *et al.*, 2002, 2004). La gran mayoría de formas endokársticas del Levante mallorquín está excavada en los materiales calcareníticos de la *Unidad Arrecifal*, correspondientes a depósitos de plataforma carbonatada somera que incluyen abundantes bioconstrucciones en forma de barreras o manchas de corales de

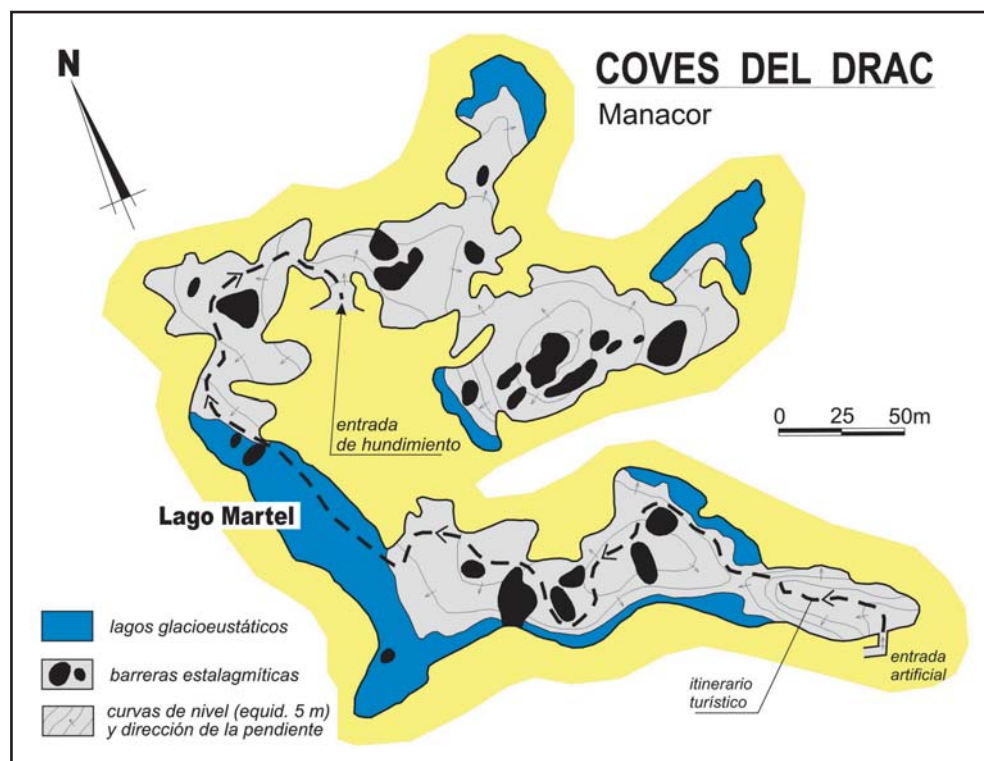


Figura 3. Topografía simplificada de la cueva turística más importante de Mallorca, la cual supone un exponente paradigmático de la karstificación en los materiales carbonatados del Mioceno superior de la isla.

desarrollo y distribución espacial muy variables lateralmente. Las zonas con mayor profusión de cuevas se relacionan con la disolución preferencial de los edificios coralinos (de mineralogía predominantemente aragonítica), aunque la evolución de algunas cavidades llega a afectar al *Complejo Terminal* suprayacente (fini-Messiniense) mediante hundimientos de las bóvedas que producen su apertura al exterior (Fornós *et al.*, 1989).

En líneas generales las cavernas de esta región natural están integradas por una sucesión de grandes salas yuxtapuestas, y enlazadas entre sí de modo en apariencia aleatorio (Fig. 3); esta estructura relativamente caótica de las cavidades obliga al visitante a numerosos ascensos y descensos que se corresponden con grandes acumulaciones de bloques rocosos desprendidos de bóvedas y paredes. Estos procesos generalizados de hundimiento y reajuste mecánico, junto con la progresiva puesta en solución de los productos clásticos resultantes, ha desorganizado del todo una red de cavidades iniciales excavadas previamente en la zona freática litoral. Los citados mecanismos de colapso individualizan, dentro de la misma cueva, diferentes unidades volumétricas consistentes en amplias salas intercomunicadas entre ellas en sus cotas inferiores, las cuales están con frecuencia ocupadas por lagos de aguas salobres de dimensiones notables (Fig. 4a). El crecimiento tridimensional de estas cuevas origina, en última instancia, su apertura al exterior mediante hundimientos zenitales o laterales de las salas más próximas a la superficie. Las archiconocidas Coves del Drac (Ginés y Ginés, 1992) son un muy buen ejemplo de lo descrito, al

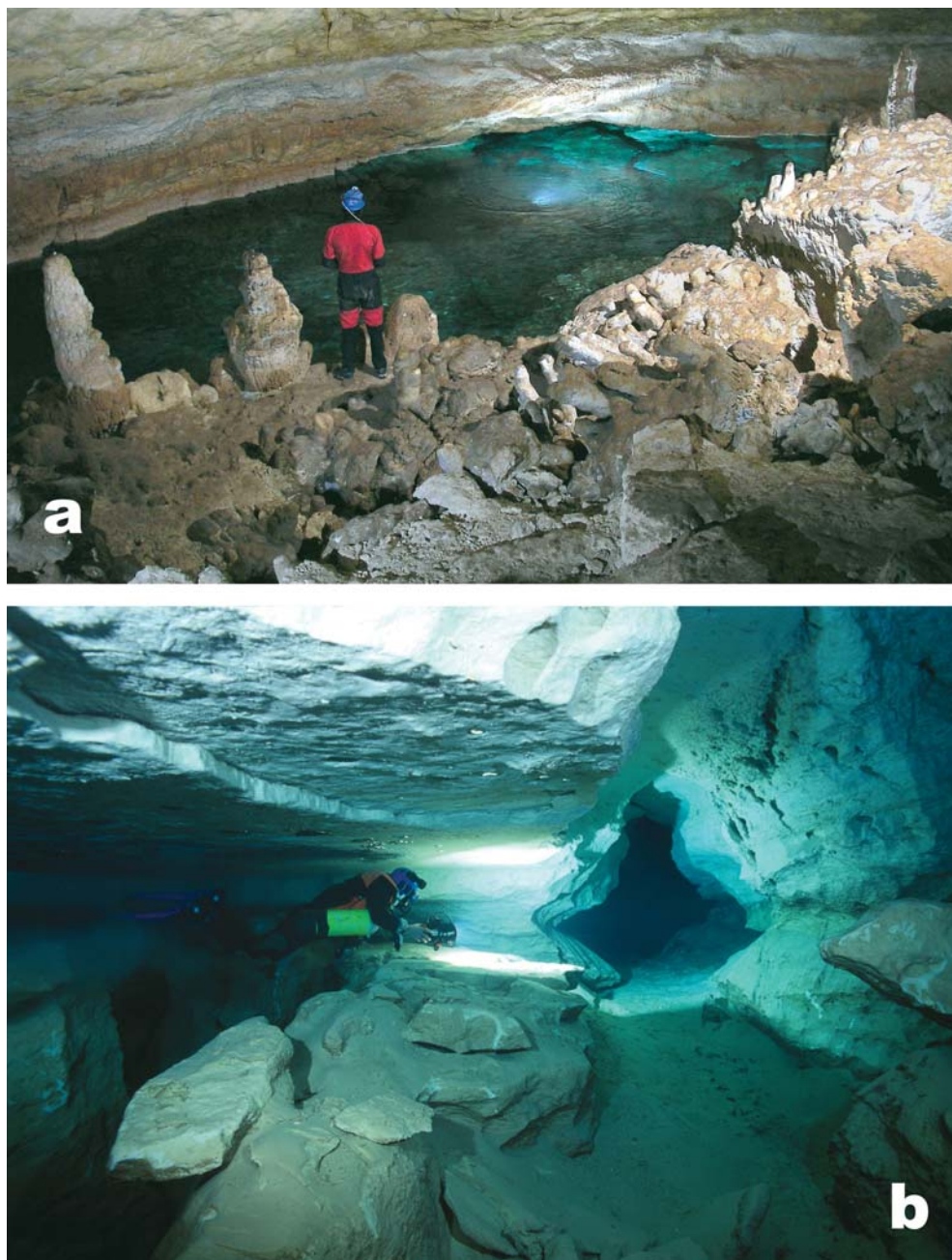


Figura 4. Aspectos morfológicos de los fenómenos endokársticos del Levante de Mallorca. a) vista de una de las salas del sector aéreo de las Coves del Pirata (Manacor), donde se aprecian algunos de los rasgos más característicos de su apariencia actual: extensos lagos de aguas salobres, que inundan amplias salas de hundimiento decoradas por depósitos estalagmíticos (foto: Antoni Merino). b) aspecto de las galerías inundadas de la Cova Genovesa (Manacor), que serían representativas de las fases iniciales de excavación freática de las cavidades de la zona (foto: Oscar Espinasa).

igual que sucede con otras cavidades como la Cova Genovesa (Gràcia *et al.*, 2003), ambas en el municipio de Manacor.

Aparte de las morfologías y sedimentos ligados a los procesos clásticos antes mencionados, la gran abundancia y variedad de espeleotemas configura un particular binomio morfológico que caracteriza el endokarst del Levante de Mallorca, otorgándole la belleza y espectacularidad que lo han hecho famoso internacionalmente (Fig. 4a). En algunas localidades destaca la abundancia de estalactitas que tapizan de manera extensiva los techos de sus salas. Asimismo, es habitual la presencia de una rica y voluminosa ornamentación estalagmítica (estalagmitas, columnas y coladas) que se asienta sobre un sustrato inestable de bloques rocosos desprendidos, hecho que provoca fenómenos de solifluxión hipogea que se traducen en la rotura y el desplazamiento de estos depósitos cristalinos.

Los mecanismos morfogenéticos que han generado estas cuevas han sido establecidos a partir de las localidades clásicas de los alrededores de Portocristo (Ginés y Ginés, 1992; Ginés, 1995a). Se trata de cavernas que han experimentado una notoria y dilatada evolución en condiciones vadosas (hundimientos de bóvedas, deposición de espeleotemas...), pero para las cuales cabe suponer una génesis inicial asociada a la zona freática litoral (Figs. 4b y 5). En este particular ambiente geoquímico, la mezcla entre las aguas subterráneas continentales y el agua marina puede dar lugar a intensos procesos de disolución de la roca caliza, tal como ha sido puesto de relieve en numerosos karsts costeros de diversas partes del planeta (Back *et al.*, 1984; Mylroie y Carew, 2000; Smart *et al.*, 2006).

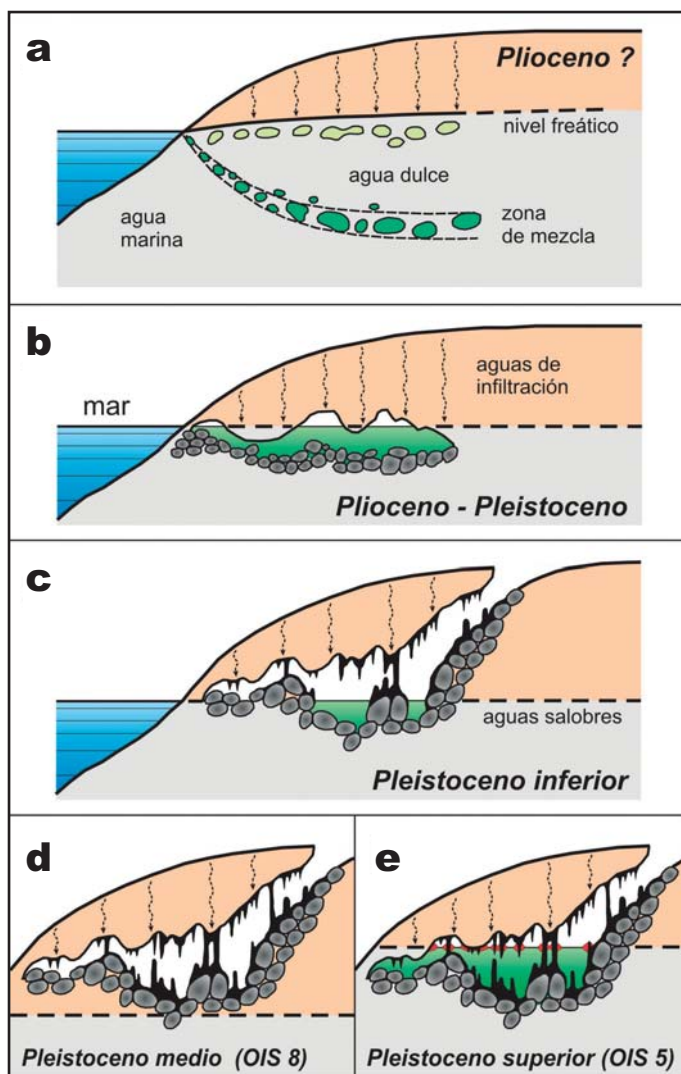
La primera fase espeleogenética consistiría, pues, en la excavación por disolución en condiciones freáticas de una red de cavidades y vacíos, relacionados con las dos zonas donde fluyen aguas potencialmente agresivas: la parte superior de la lente de agua dulce y la zona de mezcla antes mencionada. Con posterioridad (Plioceno-Pleistoceno inferior), las cavidades experimentaron considerables modificaciones como consecuencia de una complicada sucesión de crisis mecánicas, que provocan hundimientos, y momentos de relativa estabilidad que permiten el crecimiento de una exuberante decoración estalagmítica (Fig. 5). En este decurso las cuevas han crecido significativamente en volumen, y las morfologías de disolución originarias han desaparecido casi por completo. Es probable que un importante factor desencadenante de hundimientos no sea otro que los desequilibrios mecánicos que se producen en las bóvedas durante episodios de descenso de la superficie freática, relacionados con las fluctuaciones regresivas del nivel marino. Las oscilaciones glacio-eustáticas más recientes (Pleistoceno medio y superior) controlan finalmente ciertos retoques morfológicos adicionales. Por ejemplo, durante fluctuaciones de signo negativo (glaciaciones) se forman estalagmitas aéreas en el fondo de lo que son los lagos actuales de las cuevas. Por el contrario, las oscilaciones positivas del nivel del Mediterráneo (eventos interglaciales) originan la inundación parcial o total de las cavidades (Fig. 6), produciéndose la deposición de espeleotemas freáticos –a diversas alturas– que registran el nivel actual o pretérito de las aguas marinas.

ESPELEOTEMAS FREÁTICOS E HISTORIA DEL NIVEL MARINO

Como ya se ha mencionado con anterioridad, uno de los rasgos más definitorios del endokarst costero de Mallorca está constituido por la abundancia de lagos de aguas salobres, que inundan las cotas inferiores de las cavidades en correspondencia altimétrica e hidrodinámica con el actual nivel del Mediterráneo (Ginés, 1995a). El control marino de la posición y del comportamiento hidrológico de estos lagos es bien patente, ya que experi-

Figura 5.

Secuencia evolutiva propuesta para la morfogénesis de las cuevas kársticas del Levante de Mallorca. a) excavación inicial en régimen freático ligada a situaciones geoquímicas específicas (zona epifreática y zona de mezcla entre aguas continentales y marinas). b) desarrollo volumétrico de la cavidad mediante hundimientos y ajustes mecánicos de las bóvedas. c) espectaculares fenómenos de estalagmitización cubren un potente sustrato de bloques rocosos, d) durante importantes oscilaciones negativas del nivel marino se forman estalagmitas aéreas en lo que son los actuales lagos de la cueva. e) las fluctuaciones glacioeustáticas del nivel marino quedan registradas en forma de alineaciones de espeleotemas freáticos.



mentan fluctuaciones periódicas de su nivel, correspondientes a oscilaciones marinas menores de origen mareal y/o barométrico. En este particular ambiente geoquímico de carácter freático, caracterizado por un más o menos elevado contenido en cloruros, se puede constatar hoy en día la generación de precipitados de carbonatos (revestimientos cristalinos formando bandas horizontales, láminas de calcita flotante, etc.) asociados a la superficie de los mencionados lagos subterráneos (Pomar *et al.*, 1979). Del mismo modo que estos espeleotemas freáticos subactuales evidencian la presente posición del nivel marino, antiguas cristalizaciones similares –situadas a cotas diversas, tanto positivas como negativas (Fig. 7)– resultan un excelente registro de la altimetría de pretéritas líneas de costa, relacionadas con las fluctuaciones glacioeustáticas pleistocénicas (Ginés y Ginés, 1974; Ginés *et al.*, 1981a; Pomar *et al.*, 1987; Ginés, 2000; Ginés *et al.*, 2002, 2003). Estos

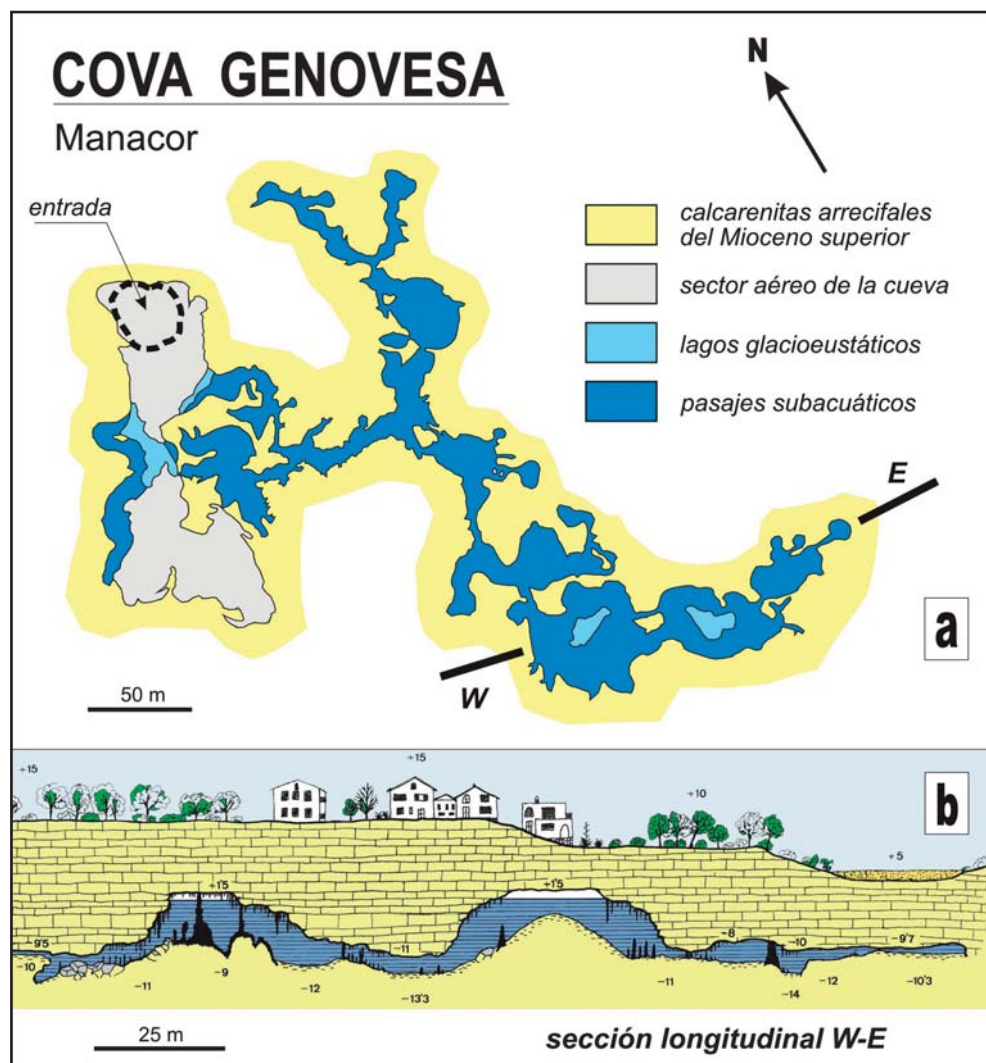


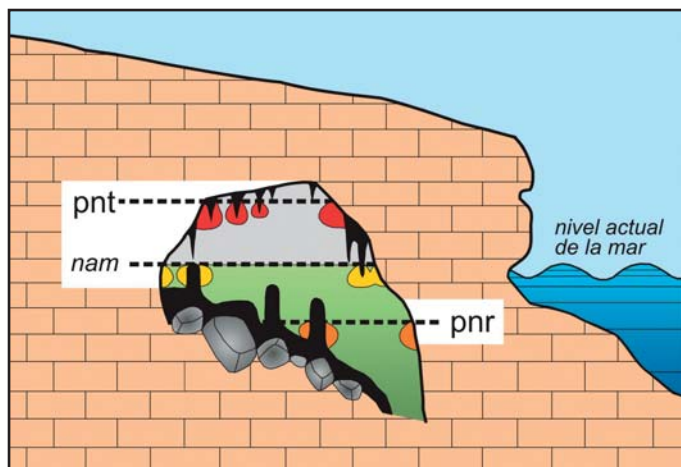
Figura 6. Topografía de una importante cueva costera cercana a Cala Anguila (Manacor), según Gràcia *et al.* (2003). a) planta de la cavidad con indicación de los sectores total o parcialmente inundados por las aguas freáticas. b) sección longitudinal de algunas de las salas, en la cual se pueden apreciar las diferentes unidades volumétricas de hundimiento que configuran la cueva.

depósitos complementan eficazmente el registro marino clásico –playas fósiles con fauna malacológica, plataformas de abrasión, etc– que tan bien representado se encuentra en Mallorca (Cuerda, 1975; Pomar y Cuerda, 1979).

Por el momento se han reconocido al menos 30 paleoniveles de espeleotemas freáticos situados a cotas muy diversas, que van desde +46 metros s.n.m. hasta -23 metros por debajo del ± 0 actual (Fig. 8). Las alineaciones de este tipo de espeleotemas localizadas a cotas positivas registran picos transgresivos asociados a eventos de signo cálido, mientras que los

Figura 7.

Sección idealizada de una cueva litoral de Mallorca en la que se aprecian diversas alineaciones horizontales de espeleotemas freáticos. Aparte del nivel actual del mar (nam), se encuentran registrados tanto un paleonivel transgresivo (pnt) correspondiente a un episodio de signo cálido, como un paleonivel regresivo (pnr) asociado a un evento de carácter frío.



especímenes recolectados por debajo del nivel marino corresponden a episodios regresivos de relativo carácter frío. La recolección de muestras, en las zonas sumergidas de determinadas cavidades litorales, ha sido posible gracias a la importancia alcanzada en la actualidad por las exploraciones de los espeleobuceadores mallorquines (Gràcia *et al.*, 1998, 2000, 2003; Gràcia y Clamor, 2002); estas actividades han permitido tener a acceso a una vertiente poco conocida dentro del estudio de las fluctuaciones eustáticas del Mediterráneo, como son las pulsaciones negativas ligadas a acontecimientos climáticos de signo frío.

Haciendo referencia brevemente a los aspectos mineralógicos y cristalográficos de los espeleotemas freáticos, se puede afirmar que la calcita y, en segundo término, el aragonito son las mineralogías dominantes en estos depósitos. En particular, las cristalizaciones de aragonito no son raras en los depósitos situados por encima del nivel actual del mar; muy probablemente, la mineralogía aragonítica podría tener un claro significado paleoclimático relacionado con episodios de signo cálido y marcada aridez (Ginés *et al.*, 1981b; Pomar *et al.*, 1987; Vesica *et al.*, 2000; Ginés *et al.*, 2005).

El núcleo principal de las investigaciones desarrolladas sobre los espeleotemas freáticos de Mallorca está constituido por diversos programas de dataciones isotópicas (método Th/U) emprendidos desde comienzos de la década de los años 1980 (Hennig *et al.*, 1981; Ginés y Ginés 1993; Tuccimei *et al.*, 1998, 2000; Ginés *et al.*, 2002, 2003). La consecución de cronologías absolutas fiables, de los espeleotemas freáticos muestreados, serviría de base para reconstruir en detalle la historia del nivel marino durante los últimos 350 ka, lapso de tiempo que corresponde al rango de aplicación de la técnica radiométrica empleada. Concretamente se ha podido construir una curva eustática detallada para el período 60-150 ka BP, lapso de tiempo que incluye el último interglacial (estadio isotópico 5e). También se han efectuado análisis de isótopos estables (Vesica *et al.*, 2000) de cara a obtener informaciones sobre el paleoclima durante el Pleistoceno superior en nuestra área geográfica.

Con la finalidad de afinar lo más posible la curva eustática obtenida, se han realizado nuevas dataciones Th/U de alta precisión, efectuadas mediante técnicas TIMS (*Thermal Ionization Mass Spectrometry*) y, mayoritariamente, MC-ICPMS (*Multi-Collector Inductively Coupled Mass Spectrometry*). Han sido datadas nuevamente un total de 24 muestras (Tuccimei *et al.*, 2006), correspondientes a paleoniveles de espeleotemas freáticos recolec-

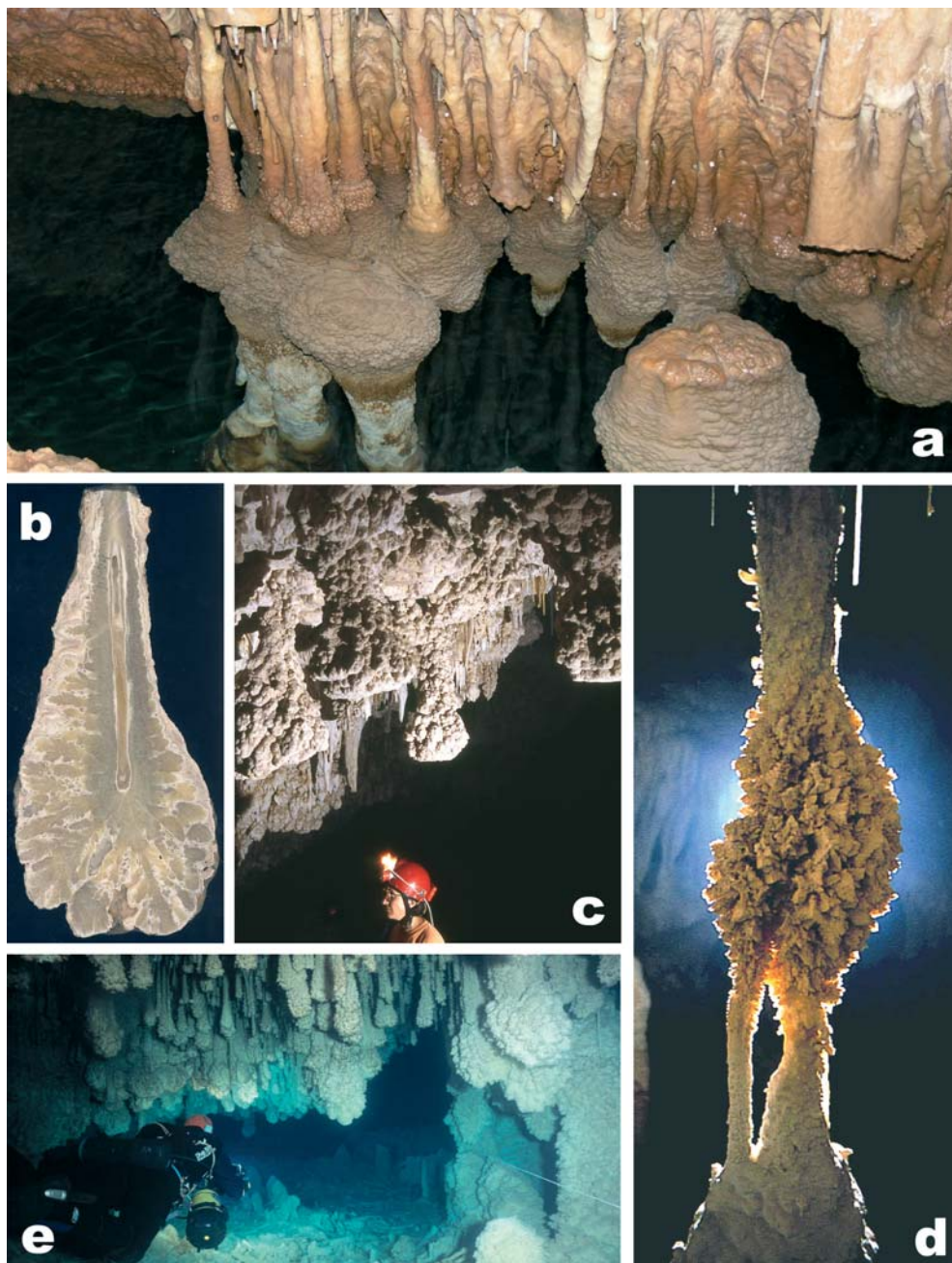
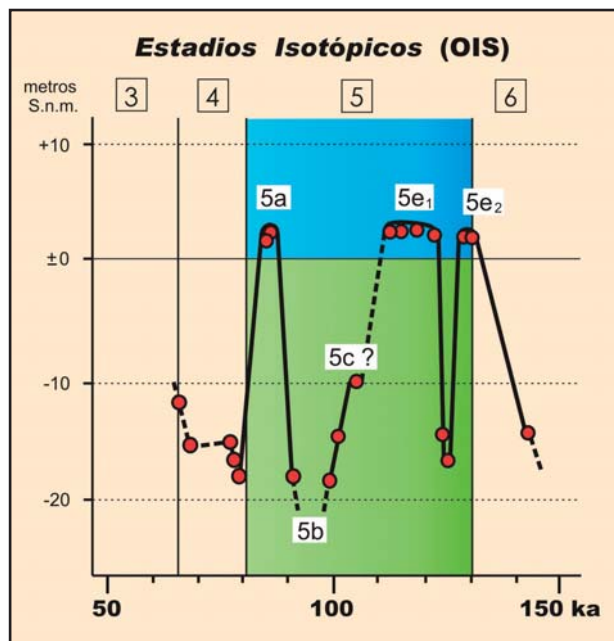


Figura 8. Espeleotemas freáticos de algunas cavidades mallorquinas. a) sobrecrecimiento subactual que se desarrolla en correspondencia con el presente nivel marino. b) sección de un sobrecrecimiento freático de calcita depositado sobre una estalactita aérea preexistente. c) espectaculares espeleotemas freáticos observables por encima del actual nivel del Mediterráneo. d) engrosamiento de cristalizaciones freáticas que registra un paleonivel marino transgresivo, correspondiente probablemente al último interglacial. e) espeleotemas freáticos sumergidos, relacionados con un paleonivel marino regresivo de signo frío (foto: Oscar Espinasa).

Figura 9.

Curva de las oscilaciones del nivel del Mediterráneo durante el estadio isotópico 5, según las dataciones Th/U (MC-ICPMS y TIMS) de espeleotemas freáticos procedentes de 10 cuevas costeras de Mallorca.



tados a cotas comprendidas entre +3 y -23 metros s.n.m.; 10 de las muestras corresponden a estabilizaciones de signo positivo (transgresiones interglaciales), mientras que las 14 restantes pertenecen a paleoniveles regresivos situados por debajo del presente nivel marino. Todas las muestras contaban ya con dataciones Th/U previas, realizadas mediante espectrometría alfa y con errores asociados relativamente elevados (5-15 %). Los nuevos datos obtenidos utilizando técnicas de espectrometría de masas comportan errores muy bajos, que en general no sobrepasan el 1 % ($\pm 1\sigma$).

Las edades obtenidas abarcan un rango temporal comprendido entre 77,8 y 143,6 ka BP, haciendo posible establecer una nueva curva eustática del último interglacial (Fig. 9), todavía más precisa que las propuestas con anterioridad. Esta curva presenta tres picos transgresivos, que alcanzan como máximo +3 metros s.n.m.; la cronología de estas tres estabilizaciones elevadas del nivel del Mediterráneo es la siguiente: 82,3-84,2 ka, 109,9-122,7 ka y 128,5-138 ka BP. El pico transgresivo más reciente se situaría en el subestadio isotópico 5a (Neotirreniense), mientras que los otros dos picos corresponden al subestadio 5e, que representa el óptimo climático del último interglacial (Eutirreniense, con fauna termófila plena). Durante el subestadio 5c el nivel marino previsiblemente no alcanzó cotas cercanas o superiores al actual ± 0 metros.

Los presentes datos documentan abruptas fluctuaciones del nivel marino acontecidas a lo largo del último gran evento interglacial, relacionadas con drásticos y muy rápidos cambios climáticos, a las que se superponen movimientos tectónicos de mucha menor magnitud, tal como se comentará a continuación. Las tasas medias de ascenso y descenso del nivel marino deducibles de nuestras investigaciones superan los 5 metros por milenio (Tuccimei *et al.*, 2006), con fluctuaciones de 18 metros de amplitud ocurridas en lapsos de tiempo inferiores a los 5.000 años.

LA ACTIVIDAD TECTÓNICA RECIENTE

La clara relación existente entre el crecimiento de los espeleotemas freáticos y el nivel del mar contemporáneo a su formación permite el control de la evolución tectónica de un área, comparando las edades y alturas de estos depósitos con las curvas eustáticas regionales. En el Levante de Mallorca, la diferente posición altimétrica de espeleotemas freáticos de la misma edad sugiere la existencia de una actividad tectónica reciente que debe ser tenida en consideración; en este sentido, a lo largo del área estudiada, las alineaciones de espeleotemas freáticos atribuidas a los eventos transgresivos 5a y 5e se encuentran registradas a elevaciones que se incrementan en dirección Norte (Tuccimei *et al.*, 1998; Fornós *et al.*, 2002). Este hecho supone una evidencia clara de un basculamiento tectónico que ha tenido lugar, al menos parcialmente, después del subestadio isotópico 5a (aproximadamente 83 ka BP), ya que depósitos de dicho subestadio están localizados actualmente a altitudes que discrepan entre sí algo más de un metro. La constatación de esta actividad neotectónica no resta validez a la curva eustática presentada en el apartado anterior en razón de su escasa magnitud; además dicho basculamiento no afecta exclusivamente al registro constituido por los espeleotemas freáticos, sino que es también extensivo a los datos obtenidos en base a evidencias geomorfológicas y/o paleontológicas.

Considerando que la deformación tectónica hubiese sido continua a partir del subestadio 5a (~83 ka BP) hasta la actualidad, y que la discrepancia de alturas observada es aproximadamente de 1,5 metros, la velocidad mínima media del basculamiento puede ser estimada en 0,02 mm/año de desplazamiento entre la parte meridional del área y su extremo Norte, más elevado en términos relativos (Fornós *et al.*, 2002). Los datos obtenidos procedentes del estudio de los espeleotemas freáticos han sido comparados con otras evidencias tectónicas regionales de carácter estratigráfico y geomorfológico, que ponen de manifiesto asimismo –según los mencionados autores– la existencia del basculamiento postulado. En consecuencia, la investigación de los espeleotemas freáticos se presenta también como una herramienta útil en los estudios de geología estructural, que puede permitir la cuantificación de la velocidad de los procesos tectónicos recientes con una precisión elevada.

EPÍLOGO

El Levante de Mallorca constituye un escenario privilegiado, de cara a la investigación de las interferencias que se dan entre los diversos sistemas de erosión que confluyen en los litos rocosos calcáreos. La propia génesis y evolución de las abundantes cavidades endokársticas resulta controlada por las vicisitudes del nivel marino, ofreciendo estas cuestiones un amplio potencial de estudio desde los puntos de vista geocronológico y paleoclimático. Concretamente, los espeleotemas freáticos de las cuevas costeras representan un singular y fiel registro de las oscilaciones del nivel del Mediterráneo durante el Pleistoceno superior, pudiendo proporcionar también informaciones de interés sobre la tectónica reciente.

Agradecimientos

El presente trabajo es una contribución al proyecto de investigación CGL2006-11242-C3-01/BTE de la DGI del Ministerio de Educación y Ciencia - FEDER.

Es necesario expresar nuestro reconocimiento a Francesc Gràcia, Bernat Clamor y Oscar Espinasa por las informaciones y materiales gráficos relacionados con las recientes exploraciones subacuáticas realizadas en algunas cuevas del Levante de Mallorca.

BIBLIOGRAFÍA

- Back, W., Hanshaw, B.B. y Van Driel, J.N. (1984). Role of groundwater in shaping the eastern coastline of the Yucatan Peninsula, México. In: Lafleur, R.G. (Ed.) *Groundwater as a geomorphic agent*. Allen & Unwin Inc. 281-293. Boston.
- Cuerda, J. (1975). *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. Instituto de Estudios Baleáricos. 304 pp. Palma de Mallorca.
- Ford, D.C. y Williams, P.W. (1989). *Karst geomorphology and hydrology*. Unwin Hyman, 601 pp. Londres.
- Fornós, J.J., Gelabert, B., Ginés, A., Ginés, J., Tuccimei, P. y Vesica, P.L. (2002). Phreatic overgrowths on speleothems: a useful tool in structural geology in littoral karstic landscapes. The example of eastern Mallorca (Balearic Islands). *Geodinamica Acta*, 15: 113-125.
- Fornós, J.J., Obrador, A. y Pomar, L. (2004). La sedimentación postorogénica de las Baleares. In: Vera, J.A. (Coord.) *Geología de España*. Sociedad Geológica de España – Instituto Geológico y Minero de España, cap. 4.7.5, 463-464. Madrid.
- Fornós, J.J., Pomar, L. y Ramos, E. (2002). Tertiary: Balearic Islands. In: Gibbons, W. & Moreno, T. (Eds.) *The Geology of Spain*. Geological Society of London, pp. 327-334. Londres.
- Fornós, J.J., Pretus, J.L. y Trias, M. (1989). La Cova de sa Gleda (Manacor, Mallorca), aspectes geològics i biològics. *Endins*, 14-15: 53-59. Palma de Mallorca.
- Ginés, A. y Fiol, L.A. (1981). Estratigrafía del yacimiento de la Cova des Fum (Sant Llorenç, Mallorca). *Endins*, 8: 25-42. Palma de Mallorca.
- Ginés, A. y Ginés, J. (1974). Consideraciones sobre los mecanismos de fosilización de la Cova de sa Bassa Blanca y su paralelismo con formaciones marinas del Cuaternario. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 19: 11-28. Palma de Mallorca.
- Ginés, A. y Ginés, J. (1992). Las Coves del Drac (Manacor, Mallorca). Apuntes históricos y espeleogenéticos. *Endins*, 17-18: 5-20. Palma de Mallorca.
- Ginés, A., Ginés, J. y Pomar, L. (1981a). Phreatic speleothems in coastal caves of Majorca (Spain) as indicators of Mediterranean Pleistocene paleolevels. *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 533-536. Bowling Green.
- Ginés, J. (1995a). L'endocarst de Mallorca: els mecanismes espeleogenètics / Mallorca's endokarst: the speleogenetic mechanisms. In: Ginés, A. y Ginés, J. (Eds.): *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. *Endins*, 20 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 3: 71-86. Palma de Mallorca.
- Ginés, J. (1995b). Les coves turístiques de Mallorca / The touristic show caves of Mallorca. In: Ginés, A. y Ginés, J. (Eds.): *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. *Endins*, 20 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 3: 191-203. Palma de Mallorca.
- Ginés, J. (2000). *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesis Doctoral. Universitat de les Illes Balears. 595 pp. Palma de Mallorca.
- Ginés, J. y Ginés, A. (1993). Dataciones isotópicas de espeleotemas freáticos recolectados en cuevas costeras de Mallorca (España). *Endins*, 19: 9-15. Palma de Mallorca.
- Ginés, J., Fornós, J.J. y Ginés, A. (2005). Els espeleotemes freàtics del Quaternari de Mallorca: aspectes morfològics, mineralògics i cristal·logràfics. In: Sanjaume, E. y Mateu, J.F. (eds.) *Geomorfologia litoral i Quaternari. Homenatge al professor Vicenç M. Rosselló i Verger*. Universitat de València. 151-165. Valencia.
- Ginés, J., Ginés, A. y Pomar, L. (1981b). Morphological and mineralogical features of phreatic speleothems occurring in coastal caves of Majorca (Spain). *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 529-532. Bowling Green.
- Ginés, J., Tuccimei, P., Fornós, J.J., Ginés, A., Gràcia, F. y Vesica, P.L. (2002). Los espeleotemas freáticos de las cuevas costeras de Mallorca: su contribución al estudio del Cuaternario / Els espeleotemes freàtics de les coves costaneres de Mallorca: la seva contribució a l'estudi del Quaternari. *Boletín SEDECK*, 3: 76-90.
- Ginés, J., Tuccimei, P., Fornós, J.J., Ginés, A., Gràcia, F. y Vesica, P.L. (2003). The upper Pleistocene sea-level history in Mallorca (western Mediterranean) approached from the perspective of coastal phreatic speleothems. In: Ruiz, M.B., Dorado, M., Valdeolmillos, A., Gil, M.J., Bardají, T., de Bustamante, I. y Martínez, I. (eds.) *Quaternary climatic changes and environmental crises in the Mediterranean region*. Universidad de Alcalá - Ministerio de Ciencia y Tecnología - INQUA. 241-247. Alcalá de Henares, Madrid.
- Gómez-Pujol, L. (2006). *Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 223 pp. Inédita.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2001). Les microformes de meteorització del litoral calcari de Mallorca: aproximació a la seva sistematització. *Endins*, 24: 169-185. Palma de Mallorca.

- Gràcia, F. y Clamor, B. (2002). Las exploraciones subacuáticas en el karst litoral del Migjorn de Mallorca / Les exploracions subaquàtiques al carst costaner del Migjorn de Mallorca. *Boletín SEDECK*, 3: 56-75.
- Gràcia, F. & Vicens, D. (1998). Aspectes geomorfològics quaternaris del litoral de Mallorca. In: Fornós, J.J. (ed.) *Aspectes geològics de les Balears*. Universitat de les Illes Balears. 307-329. Palma de Mallorca.
- Gràcia, F., Clamor, B. y Watkinson, P. (1998). La Cova d'en Passol i altres cavitats litorals situades entre Cala sa Nau i Cala Mitjana (Felanitx, Mallorca). *Endins*, 22: 5-18. Palma de Mallorca.
- Gràcia, F., Clamor, B. y Laverigne, J.J. (2000). Les coves de Cala Varques (Manacor, Mallorca). *Endins*, 23: 41-57. Palma de Mallorca.
- Gràcia, F., Jaume, D., Ramis, D., Fornós, J.J., Bover, P., Clamor, B., Gual, M.A. y Vadell, M. (2003). Les coves de Cala Anguila (Manacor, Mallorca). II: La Cova Genovesa o Cova d'en Bessó. Espeleogènesi, geomorfologia, hidrologia, sedimentologia, fauna, paleontologia, arqueologia i conservació. *Endins*, 25: 43-86. Palma de Mallorca.
- Grodzicki, J. (1985). Genesis of the Nullarbor Plain caves in Southern Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 29 (1): 37-49. Berlín.
- Guilcher A., Battistini, R. y Nicod, J. (Eds.) (1982). *Karsts Littoraux. Actes du Colloque de Perpignan. 15-17 Mai 1982*. Association Française de Karstologie. Memoire 4. 96 pp. Nimes.
- Hennig, G.J., Ginés, A., Ginés, J. y Pomar, L. (1981). Avance de los resultados obtenidos mediante datación isotópica de algunos espeleotemas subacuáticos mallorquines. *Endins*, 8: 91-93. Palma de Mallorca.
- Jennings, J. (1985). *Karst geomorphology*. Basil Blackwell. 293 pp. Oxford.
- Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. y Dreybrodt, W. (Eds.) (2000). *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society. 527 pp. Huntsville.
- Montoriol-Pous, J. (1961). El karst de la isla de Cabrera. *Speleon*, 12 (1-2): 5-34. Oviedo.
- Montoriol-Pous, J. (1971). Nota sobre la génesis de la Foradada (Conejera, Baleares). *Geo y Bio Karst*, 28: 17-19. Barcelona.
- Myroie, J.E. y Carew, J.L. (2000). Speleogenesis in coastal and oceanic settings. In: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. y Dreybrodt, W. (Eds.) *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society. 226-233. Huntsville.
- Nicod, J. (1986). Les karsts littoraux, directions et methodes d'étude. *Travaux U.A. 903 C.N.R.S.* 15: 13-19. Aix en Provence.
- Plummer, J.N. (1975). Mixing of sea water with calcium carbonate ground water. *Geol. Soc. Amer. Mem.* 142: 219-236.
- Pomar, L. y Cuerda, J. (1979). Los depósitos marinos pleistocénicos en Mallorca. *Acta Geológica Hispánica. Homenatge a Lluís Solé i Sabarís*. 14: 505-513. Barcelona.
- Pomar, L., Ginés, A. y Ginés, J. (1979). Morfología, estructura y origen de los espeleotemas epiacuáticos. *Endins*, 5-6: 3-17. Palma de Mallorca.
- Pomar, L., Rodríguez, A., Fornós, J.J., Ginés, A., Ginés, J., Font, A. y Mora, A. (1987). Phreatic speleothems in coastal caves: a new method to determine sea-level fluctuations. In: Zazo, C. (Ed.): *Late Quaternary sea-level changes in Spain*. Museo Nacional de Ciencias Naturales C.S.I.C. *Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario*, 10: 197-224. Madrid.
- Smart P.L., Beddows P.A., Coke J., Doerr S., Smith S. y Whitaker F.F. (2006). Cave development on the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico. In: Harmon R.S y Wicks C. (Eds.) *Perspectives on karst geomorphology, hydrology and geochemistry*. The Geological Society of America, Special Paper 404: 105-128.
- Tuccimei, P., Ginés, J., Ginés, A., Fornós, J.J. y Vesica, P.L. (1998). Dataciones Th/U de espeleotemas freáticos controlados por el nivel marino, procedentes de cuevas costeras de Mallorca (España). *Endins*, 22: 99-107. Palma de Mallorca.
- Tuccimei, P., Ginés, J., Delitala, C., Pazzelli, L., Taddeucci, A., Clamor, B., Fornós, J.J., Ginés, A. y Gràcia, F. (2000). Dataciones Th/U de espeleotemas freáticos recolectados a cotas inferiores al actual nivel marino en cuevas costeras de Mallorca (España): aportaciones a la construcción de una curva eustática detallada de los últimos 300 ka para el Mediterráneo occidental. *Endins*, 23: 59-71. Palma de Mallorca.
- Tuccimei, P., Ginés, J., Delitala, C., Ginés, A., Gràcia, F., Fornós, J.J. y Taddeucci, A. (2006). Last interglacial sea level changes in Mallorca island (Western Mediterranean). High precision U-series data from phreatic overgrowths on speleothems. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50 (1): 1-21. Berlín.
- Vesica, P.L., Tuccimei, P., Turi, B.; Fornós, J.J., Ginés, A. y Ginés, J. (2000). Late Pleistocene Paleoclimates and sea-level change in the Mediterranean as inferred from stable isotope and U-series studies of overgrowths on speleothems, Mallorca, Spain. *Quaternary Science Reviews*, 19: 865-879.

Anexo 2.7

Itinerario y paradas complementarias

Parada 1. Cova Genovesa

Se trata de una cueva kárstica litoral situada cerca de Cala Anguila, en el municipio de Manacor. Presenta un desarrollo planimétrico de unos 2.500 m, de los cuales la gran mayoría (1.845 m) consisten en galerías y salas totalmente inundadas, que requieren técnicas de exploración subacuática (ver Fig. 6, del capítulo 2.7).



Figura 1. Cova Genovesa (Manacor) Vista de la sala de entrada, en la cual se puede observar la rampa empedrada que desciende hasta el lago (foto: R. Landreth).

El acceso consiste en una depresión subcircular originada por el hundimiento del techo de una amplia sala. La visita se limitará a la sala de entrada (Fig. 1), la cual permitirá observar algunos de los rasgos morfológicos habituales en las cavidades naturales del Levante de la isla. En esta gran sala se localizan diferentes construcciones ciclópeas prehistóricas de cierto interés (Fig. 2).

En las cotas inferiores de la sala de acceso se alcanza un lago de aguas salobres, que de hecho representa el nivel freático actual. Los lagos de estas cuevas costeras están del todo controlados por la posición del nivel marino, constatándose oscilaciones de su superficie relacionadas con las mareas y/o las fluctuaciones barométricas. En las inmediaciones del lago será posible observar una sutil franja horizontal de cristalizaciones, que se extiende a una altura de +2 m snm y registra un paleo-nivel del Mediterráneo correspondiente al último interglacial.



Figura 2. Cova Genovesa (Manacor). Pasarela construida en tiempos prehistóricos, para facilitar el acceso al interior de la cueva vadeando las aguas del primer lago. Su construcción documenta un nivel marino al menos 1 m inferior al actual, ocurrido unos 3-4 ka B.P. (foto: R. Landreth).

Parada 2. Coves del Drac

Esta importante cavidad kárstica está situada en las cercanías de Portocristo, en el término municipal de Manacor. Sin duda nos hallamos ante la cueva turística más importante del estado español, con cifras de visitantes que se acercan al millón anual de turistas. Aunque ya era frecuentada durante todo el siglo XIX, las exploraciones del pionero espeleólogo francés Edouard A. Martel, efectuadas en 1896, dieron a conocer un espléndido conjunto de grandes lagos subterráneos y salas extraordinariamente decoradas por depósitos estalagmíticos (Fig. 3). Las incursiones organizadas a la cueva comenzaron ya a finales del siglo XIX, pudiéndose hablar de una explotación turística sistemática a partir del año 1922. El desarrollo planimétrico actual de la cavidad se acerca a los 3.000 m.

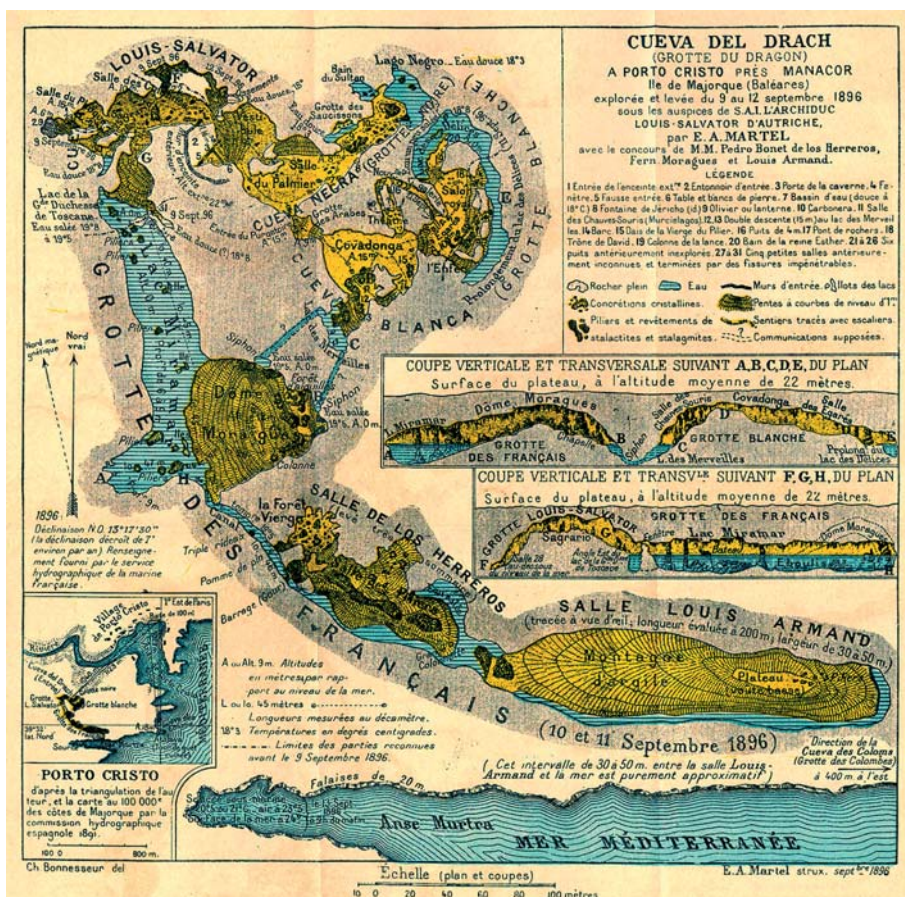


Figura 3. Plano de las Coves del Drac (Manacor) levantado por Edouard A. Martel el año 1896.

La morfología general de la cueva está caracterizada por tres aspectos: la relevancia de los mecanismos de hundimiento de las bóvedas, la exuberancia de la decoración de espeleotemas y la presencia de extensos lagos de aguas salobres (Fig. 4). Aunque Martel afirmaba erróneamente, a finales del siglo XIX, que las Coves del Drac eran una cueva de erosión marina –pero de excepcional magnitud–, se trata de un ejemplo destacable de la karstificación litoral ligada a los procesos de mezcla entre las aguas continentales y marinas. Una red inicial de conductos y vacíos freáticos, generados por disolución en este particular ambiente geoquímico, ha sido progresivamente dismantelada y enmascarada por los procesos de hundimiento y de estalagmitización, sufriendo la cavidad diversos retoques morfológicos adicionales condicionados por las oscilaciones glacio-eustáticas del Mediterráneo durante el Pleistoceno. El aspecto más destacable de su evolución reciente consiste en el registro de la historia del nivel marino deducible de los espeleotemas freáticos, asociados a los lagos subterráneos de ésta y de otras cuevas de la zona.

Esta localidad constituye un exponente paradigmático del endokarst desarrollado en los materiales calcareníticos del Mioceno superior de Mallorca, y de cómo su génesis y evolución ha estado controlada en todo momento por el carácter litoral de los procesos geomorfológicos implicados: denudación epigea, hidrología subterránea, espeleogénesis, rellenos de cavidades, etc.



Figura 4. Coves del Drac (Manacor). Aspecto del lago Miramar, también denominado lago Martel en honor de su descubridor (foto: G. Santandreu).